УДК 681.87.515

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕНТРИФУЖНЫХ КАСКАДАХ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

С.В. Филимонов, Г.М. Скорынин, А.А. Орлов*, Д.Н. Голдобин

ФГУП «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск
*Томский политехнический университет
E-mail: orlov@phtd.tpu.edu.ru

Разработана и реализована математическая модель нестационарных гидравлических процессов в промышленных центробежных каскадах обогащения урана, предназначенная для применения в качестве экспертной системы в автоматизированной системе управления технологической схемой и использования в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства.

Введение

Автоматизированная система управления технологической схемой (АСУТС) центрифужного разделительного завода предназначена для обеспечения и поддержания параметров расчетной технологической схемы (ТС) при изменяющихся внешних условиях. АСУТС основана на моделировании стационарных процессов разделения. Многолетний опыт эксплуатации показал её эффективность, особенно в последние годы, когда существенно выросли требования по качеству выпускаемой продукции.

Вместе с тем, большое влияние на работу разделительного производства оказывают нестационарные гидравлические процессы, возникающие как в ходе нормальной эксплуатации каскадов, например, при изменении частоты питающего тока, при переходе на новый технологический режим, при плановом отключении части оборудования и т.п., так и при нарушениях нормальной работы схемы, например, при закрытии внешних потоков каскадов.

Эти процессы влияют на качество выпускаемого товарного продукта, эффективность работы ТС завода и могут привести к недопустимым перегрузкам оборудования. Во всех нестационарных процессах необходимо обеспечить безопасность оборудования и свести к минимуму потери работы разделения, что и обуславливает важность изучения и учета этих процессов. Кроме того, по сравнению с диффузионными, центрифужные каскады имеют меньшее газосодержание, а следовательно и меньшую инерционность. Малая инерционность приводит к усилению влияния нестационарных процессов на эффективность работы разделительных каскадов.

В связи с этим возникла необходимость решения задачи полномасштабного учета нестационарных гидравлических процессов в разделительном производстве.

С целью решения поставленной задачи разработана и программно реализована математическая модель нестационарных гидравлических процессов в многокаскадной ТС разделительного производства.

В отличие от ранее известных работ [1], рассматриваемая модель нестационарных процессов учитывает особенности построения ТС разделительных предприятий, в частности, заключающиеся в том, что соединения ступеней в каскаде могут осуществляться по параллельно-последовательной схеме.

Кроме того, в модель включены линии межкаскадных коммуникаций (МКК), связывающие каскады между собой.

1. Описание математической модели нестационарных гидравлических процессов

1.1. Объемы, входящие в модель

В описываемой модели газосодержание ступени n каскада m многокаскадной ТС считается сосредоточенным в 10-ти объемах (для 8-секционной ступени). Из них 8 объемов роторов газовых центрифуг (ГЦ) секций i с газосодержанием M_{1inm} ступени n каскада m (i,n,m – номер секции, ступени, каскада). Газосодержание M_{1inm} определяется давлением на носике отборника тяжелой фракции после прохождения скачка уплотнения P_{w0nm} [2]:

$$M_{1inm} = V_{1inm}(\omega)P_{w0inm}, \quad i = 1-8,$$

где M_{1inm} – газосодержание роторов ГЦ i-ой секции n-ой ступени каскада m; V_{1inm} – коэффициент, зависящий от частоты вращения роторов ω и типа ГЦ.

Аналитическое выражение для газосодержания M_{1inm} определено исходя из принятой упрощенной газодинамической модели ГЦ.

В газовые центрифуги секции i ступени n подается поток питания L_{01inm} а выходят потоки легкой $L_{Л1inm}$ и тяжелой фракции L_{T1inm}. 9-ый объем трассы отвала ступени n каскада m с газосодержанием M_{2nm} и давлением P_{Tnm} включает в себя коммуникации от коллекторов отвала отдельных ГЦ до межступенного регулятора давления. Его газосодержание определяется выражением:

$$M_{2nm} = V_{2nm}P_{Tnm},$$

где M_{2nm} – газосодержание трассы отвала ступени n каскада m; V_{2nm} – константа, зависящая от физических свойств рабочего газа и геометрических размеров трассы отвала ступени n каскада m; P_{Tnm} – давление в коллекторе отвала ступени n каскада m.

В данный объем входят секционные потоки отвала L_{T2inm}, а выходит суммарный поток отвала ступени G_{Tnm} равный расходу G_{pnm} через межступенный регулятор. Принято, что поток в секционной (секция i) трассе отвала L_{T2inm} равен потоку отвала из ГЦ секции i L_{T1inm}.

10-ый объем трассы питания ступени n каскада m с газосодержанием M_{3nm} и давлением P_{0nm} может включать следующие коммуникации:

- блочная трасса отбора предыдущей ступени;
- байпасная линия отбора предыдущей ступени;
- коллектор питания ступени;
- байпасная линия отвала следующей ступени;
- блочная трасса отвала следующей ступени.

Для газосодержания трассы питания ступени n каскада m имеем:

$$M_{3nm} = V_{3nm}P_{0nm},$$

где M_{3nm} – газосодержание трассы питания ступени n каскада m; V_{3nm} – константа, зависящая от физических свойств рабочего газа и геометрических размеров трассы питания ступени n; P_{0nm} – давление в коллекторе питания ступени n каскада m.

В общем случае в этот объем могут входить следующие потоки:

- отбора двух предыдущих ступеней $G_{Лn-1,m}$, $G_{Лn-2,m}$;
- отвала следующих двух ступеней $G_{Tn+1,m}$, $G_{Tn+2,m}$.
- питания ступени T_{Rkn} и T_{Wkn}, являющиеся потоками отбора и отвала полки k ($k \neq m$) соответственно;
- внешнего питания данной ступени $T_{0n}(t)$, являющегося заданной функцией от времени t;
- воздуха $G_{Bn}(t)$ являющегося заданной функцией от времени t при моделировании нарушения вакуумной плотности оборудования.

Из 10-го объема выходит сумма потоков питания секций данной ступени L_{02inm}.

1.2. Основные уравнения нестационарной гидравлики

Основные уравнения нестационарной гидравлики – это уравнения баланса вещества в выделенных объемах, которые не учитывают коррозионные потери. Изменение газосодержания в каждом выделенном объеме определяется разностью входящих и выходящих потоков. Для выделенных объемов ступени n каскада m можно записать следующие уравнения нестационарной гидравлики:

$$\frac{dM_{1inm}}{dt} = L_{01inm} - L_{Tinm} - L_{Л1inm}\,,\; i = 1,2,...,8, \qquad (1)$$

$$\frac{dM_{2nm}}{dt} = \sum_{i=1}^{S} L_{T1inm} - G_{pnm}, \qquad (2)$$

$$\frac{dM_{3nm}}{dt} = Tn(t) + \sum_{k=1}^{K}\delta_{Rkn}T_{Rkn} + \sum_{k=1}^{K}\delta_{Wkn}T_{Wkn} +$$
$$+\delta_{Лn-1}G_{Лn-1,m} + \delta_{Лn-2}G_{Лn-2,m} + \delta_{Tn+1}G_{Tn+1,m} +$$
$$+\delta_{Tn+2}G_{Tn+2,m} + \delta_{OP}(G_{ЛNm} - T_{OPm}(t)) -$$
$$-\sum_{i=1}^{S} L_{01inm} + \delta_{Bn}G_{Bn}(t), \qquad (3)$$

где K – количество каскадов ТС; δ_{Rkn} и δ_{Wkn} – признаки связи между потоками отбора и отвала каскада k с питанием ступени n ($k \neq m$); $\delta_{Лn-1}$, $\delta_{Лn-2}$, δ_{Tn+1}, δ_{Tn+2}, δ_{Bn} – признаки наличия потока (0 или 1); δ_{OP} – признак отборной ступени (0 или 1); $G_{ЛNm}$, T_{OPm} – соответственно потоки отбора отборной ступени и каскада m.

Ур. (1) составляется для каждой секции ступени n каскада m. Уравнения (2) и (3) составляются для каждой ступени n каскада m.

1.3. Уравнения для потоков

Поток питания отдельной ГЦ L_{01inm} проходит через расходомерную диафрагму. Для потока питания ГЦ секции i ступени n каскада m имеем:

$$L_{01inm} = N_{inm}K_{0inm}P_{0inm}, \qquad (4)$$

где N_{inm} – количество ГЦ в секции i ступени n; K_{0inm} – коэффициент расхода; P_{0inm} – давление на входе в ГЦ.

Секционный поток питания L_{02inm} для принятого турбулентного течения газа по трассе питания [3] определяется следующим выражением:

$$(L_{02inm})^2\zeta_{0inm} = P_{0nm}^{\;2} - P_{0inm}^{\;2}, \qquad (5)$$

где P_{0nm} – давление в коллекторе питания ступени; P_{0inm} – давление на входе в ГЦ; ξ_{0inm} – коэффициент гидравлического сопротивления [3].

Исходя из ламинарного характера течения газа в отборнике тяжелой фракции ГЦ, для потока отвала ГЦ секции i ступени n каскада m L_{T1inm} имеем:

$$\frac{L_{T1inm}\zeta_{Tinm}}{N_{inm}} = P_{w0inm}^{\;2} - P_{Tnm}^{\;2}, \qquad (6)$$

Поток отбора ГЦ i-ой секции $L_{Л1in}$ определяем с помощью формализованной универсальной гидравлической характеристики ГЦ, которая представляется в виде:

$$L_{Л1in} = N_{inm}\begin{pmatrix} b1_{inm} + b2_{inm}\left(\frac{L_{01inm}}{N_{inm}}\right) + b3_{inm}\left(\frac{L_{01inm}}{N_{inm}}\right)^2 + \\ +b4_{inm}P_{Tnm} + b5_{inm}P_{Tnm}^{\;2} + b6_{inm}\left(\frac{L_{01inm}}{N_{inm}}\right)P_{Tn} \end{pmatrix}, \qquad (7)$$

где $b1_{inm}$–$b6_{inm}$ – коэффициенты гидравлической характеристики, зависящие от типа ГЦ, температуры помещения, температуры охлаждения ГЦ, концентрации легких примесей, частоты вращения ω и т.п.

К уравнениям (4–7) в принятой модели добавляются уравнения, связанные с работой межступенного регулятора.

Считая истечение газа через сопло регулятора критическим, запишем расход через регулятор в виде

$$Gp = D(h)P_{ДО}, \qquad (8)$$

где D – коэффициент расхода, зависящий от положения клапана регулятора h; $P_{ДО}$ – давление до регулятора.

В данной модели рассматриваются пропорциональные регуляторы с регулированием по перепаду давления P_{Tn}–P_{0n}. В этом случае линеаризованное уравнение регулятора можно записать через приращение давлений ΔP_{Tn}, ΔP_{0n}:

$$\frac{Tnd\mu}{dt} + \mu = Пn(\Delta P_{Tn} - \Delta P_{0n}), \qquad (9)$$

где $\mu = \Delta h/h$ – относительное изменение положения клапана регулятора; Tn и $Пn$ постоянная времени регулятора и коэффициент усиления регулятора ступени n; h – величина, характеризующая положение регулирующего клапана регулятора.

Внутренние потоки питания T_{Rkn}, T_{Wkn} определяются через соответствующие потоки отбора и отвала каскадов с учетом транспортной задержки τ_{zad}, под которой понимается время прохождения гидравлического возмущения по соответствующим линиям МКК. Время τ_{zad} рассчитывается исходя из уравнения неразрывности для установившегося одномерного потока, изолированного от внешней среды [2], а также из расчетных величин потоков и давлений на участках линий МКК и заданных значений геометрических размеров этих участков.

2. Схема решения уравнений нестационарной гидравлики

Расчет нестационарных гидравлических процессов сводится к нахождению величин давлений во всех введенных объемах для всех ступеней каскадов, положений регулирующего клапана межступенных регуляторов, как временных функций при заданных начальных условиях. В качестве начальных условий приняты расчетные значения давлений исходного стационарного состояния ступеней каскадов.

Входящие в уравнения (4–9) коэффициенты расхода шайб, коэффициенты гидравлических сопротивлений трасс, коэффициенты гидравлических характеристик ГЦ, параметры регуляторов и т.п. предполагаются известными из экспериментальных и расчетных данных. Подставляя выражения для газосодержания и потоков в уравнения (1–3) получим систему дифференциальных уравнений первого порядка относительно давлений P_{w0inm}, P_{Tnm}, P_{0nm}, P_{0inm} и положений регулирующего клапана регуляторов μ_{nm} для каждого из каскадов ТС.

Таким образом, задача моделирования нестационарных процессов в промышленных центрифужных каскадах сводится к решению системы дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями. Задача Коши за редким исключением не имеет аналитических методов решения. В численном методе вместо отыскания непрерывных функций времени рассчитываются значения искомых функций в дискретные моменты времени, а система дифференциальных уравнений заменяется тем или иным способом разностными уравнениями. В применяемом алгоритме использована неявная схема Эйлера с пересчетом [4], которая обладает третьим порядком точности на шаге и вторым на интервале.

Полученные системы нелинейных уравнений решаются итерационным методом Ньютона [5] на каждом временном слое. При этом процесс получения системы линейных уравнений, относящихся к одной ступени, объединяется с их частичным решением. Величины приращений давлений P_{w0inm}, P_{Tnm}, P_{0inm} относящиеся к одной ступени выражаются через приращения давлений в трассах питания ступеней P_{0nm}. В результате получаем систему линейных уравнений относительно приращений давлений в трассах питания ступеней каскадов. В предложенной расчетной модели система линейных уравнений на каждом шаге итерации решается методом исключения Гаусса [4].

На каждом временном шаге решение может дополняться расчетом нестационарной гидравлики линий МКК, состоящих из подкачивающих компрессоров, регуляторов давления различных типов и других элементов.

По предлагаемой методике проведены численные исследования для различных случаев нестационарных возмущений ТС, результаты которых позволили сделать следующие выводы:

- Результаты расчетов, для которых имеются фактические данные (изменение величин внешних потоков, закрытие блоков), позволяют судить о достаточной адекватности описанной модели поведению реального объекта;
- Расчетное время распространения гидравлических возмущений по ступеням каскадов и линиям МКК практически совпадает с имеющимися опытными данными;
- Временные характеристики модели позволяют оперативно производить расчеты многокаскадной технологической схемы в режиме реального времени.

Заключение

Предложена математическая модель нестационарных гидравлических процессов в промышленных центрифужных каскадах, учитывающая отличительные особенности построения исследуемой технологической схемы разделительных производств. Математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений первого порядка с заданными начальными условиями и позволяет получать решения в режиме реального времени при произвольном наборе возмущающих воздействий.

Разработан алгоритм решения уравнений, описывающих нестационарные гидравлические процессы, как в центрифужных каскадах, так и в линиях МКК, объединяющих эти каскады.

Предложенная модель позволяет исследовать нестационарные процессы, возникающие при изменении величин внешних потоков; отключении внешних потоков; изменении частоты и отключении питающего тока; нарушении вакуумной плотности оборудования; изменении точки подачи питания; отказах и перенастройке межступенных регуляторов; отключении/включении части оборудования; нарушениях в работе оборудования линий МКК; а также при различных сочетаниях этих воздействий.

Модель может быть использована в АСУТС в качестве экспертной системы и в компьютерном тренажере для подготовки специалистов разделительного производства [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обогащение урана / Под ред. С. Виллани. Пер. с англ. под ред. И.К. Кикоина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 316 с.
2. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
3. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 476 с.
4. Пирумов У.Г. Численные методы. – М.: Дрофа, 2003. – 221 с.
5. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Наука, 1987. – 598 с.
6. Пат. 2250509 РФ. МПК[6] G09B 9/00. Тренажер операторов системы управления технологическим процессом разделения изотопов урана центробежным методом в штатных и аварийных ситуациях / В.А. Власов, А.А. Орлов, А.Н. Шубин, С.В. Филимонов, Г.А. Колпаков. Опубл. 20.04.2005, Бюл. № 11.